

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. **Ю. В. Визильтера** на диссертационную работу **Домахиной Людмилы Григорьевны «Скелетная сегментация и циркулярная морфология многоугольников»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.09 - Дискретная математика и математическая кибернетика

В области анализа изображений модельный подход к обработке данных в значительной степени реализуется сегодня в т.н. *морфологических* подходах, предполагающих *сегментацию* исходного образа путем его описания в рамках некоторого класса моделей и его последующую *реконструкцию* на основе этого описания. В зависимости от выбранного класса моделей конкретные морфологии по своему базовому математическому аппарату могут быть множественно-алгебраическими (математическая морфология Серра), функционально-аналитическими (морфологический анализ Пытьева), вычислительно-геометрическими (непрерывная морфология Местецкого), вариационными (критериальная морфология) и т.д. При этом основной общей чертой всех этих морфологий, помимо схемы сегментации-реконструкции, является, пожалуй, опора на проективные операторы и соответствующие вложенные классы форм, упорядоченные по сложности. Основными достоинствами таких *проективных морфологий* являются их регулярный неэвристический характер, четкие математические постановки задач и использование строго обоснованных средств их решения. При этом полученные процедуры обработки и анализа данных оказываются в достаточной степени эффективными, а их свойства – заранее известными или, по крайней мере, ожидаемыми.

Диссертационная работа Л. Г. Домахиной посвящена решению проблемы сегментации и сравнения плоских фигур в задачах распознавания образов. Традиционный подход к решению задачи распознавания образов заключается в генерации большого количества произвольных признаков, последующем отборе множества информативных признаков и построении финального классификатора с использованием известных методов машинного обучения на обучающих выборках. При этом методы обучения и отбора признаков являются, как правило, математически обоснованными, а методы генерации признаков и оценки их информативности – эвристическими. Морфологический подход, напротив, опирается на природу наблюдаемых данных и в качестве их вторичного описания предлагает использовать морфологическое модельное описание, получаемое в результате процедуры сегментации. Степень информативности этого описания автоматически определяется тем, насколько полно оно позволяет реконструировать исходный образ. Примером такого модельного описания является скелетное описание, в

частности, непрерывное скелетное описание, введенное в работах Л.М. Местецкого. Однако для решения задач распознавания необходимо также определить процедуру сравнения полученных описаний – метрику или меру сходства в пространстве описаний. В случае описания образа вектором признаков в распоряжении исследователей оказывается широкий спектр известных метрик. Как правило, дело ограничивается выбором традиционной евклидовой метрики, иногда взвешенной. В случае сравнения морфологических описаний задача является нетривиальной, поскольку это не вектор, а структура (граф), и элементы ее взаимосвязаны. Для сравнения структур используются различные типы метрик, например, метрики редактирования (Левенштейн и др.), EMD-метрики (Рабнер, Томази и др.), метрики Монжа-Канторовича-Вассерштейна и т.п., но для многих содержательных классов моделей «хорошие» метрики сравнения, обеспечивающие одновременно устойчивость и чувствительность до сих пор не найдены. К сожалению, несмотря на их достаточно широкое применение в практических приложениях, к таким моделям, для которых неизвестны оптимальные методы сравнения, относятся и скелетные описания. Кроме того, скелетные описания неустойчивы к шуму и малым искажениям формы контура фигуры. Для повышения устойчивости скелетного описания фигур, как правило, используются полуэвристические процедуры «стрижки» терминальных ветвей, но они никак не гарантируют то, что полученные более устойчивые описания будут лучше работать в задачах распознавания. Таким образом, тема диссертации Л. Г. Домахиной, связанная с поиском обоснованных методов скелетной сегментации и согласованных с ними метрик сравнения, «заточенных» именно под задачи распознавания образов, является безусловно актуальной как в теоретическом, так и в практическом плане.

Для решения указанных проблем в работе предложены:

1. Критерий качества скелетной сегментации фигуры, основанный на определении функции штрафа при помощи противоположных по смыслу функций соответствия и устойчивости. Метод скелетной сегментации фигуры, основанный на минимизации циркулярной функции штрафа.

2. Критерий качества скелетной сегментации пары фигур. Метод скелетной сегментации пары фигур, основанный на минимизации циркулярной функции штрафа для пар.

3. Алгоритм поиска оптимальной сегментации пары фигур, основанный на определении циркулярной функции штрафа для пары фигур с учетом априорной информации об изоморфизме скелетов и на минимизации функции штрафа для пары. Определение множества циркуляров общего положения. Доказательство существования и

единственности решения на множестве базовых циркуляров общего положения.

4. Циркулярная мера сходства формы фигур, основанная на проекции циркулярной функции штрафа на множестве пар циркуляров.

При этом особый интерес представляют следующие развитые в работе подходы и идеи.

Автором построена математическая морфология на базе циркуляров. Само понятие *циркуляра* было введено и активно использовалось ранее Л.М. Местецким, однако Л.Г. Домахиной впервые предложены и полностью разработаны формальные аппараты как проективной, так и критериальной циркулярной морфологии. Для этого определены: множества циркуляров, операторы проектирования на множествах циркуляров, циркуляры уникальной проекции, максимальный единичный проектор, циркулярные функции штрафа, соответствия, устойчивости. Это позволило изящно решить проблему регуляризации неустойчивых скелетных описаний и соответственно проблему качества скелетной сегментации фигур.

Также построена критериальная морфология для пар циркуляров. Необходимо отметить, что идея совместной сегментации пары сравниваемых объектов замечательна и специфична именно для задач анализа изображений и распознавания образов. Эта идея эффективно реализована автором на основе определения морфологической проекции пары циркуляров на множество пар циркуляров, имеющих изоморфный скелет. Причем данный прием не только решает поставленную задачу в области сравнения скелетных описаний – он имеет интересные и важные обобщения и на другие математические морфологии. Следует особо отметить, что прием проецирования пары образов на общую составляющую их формы для определения специальной метрики между сравниваемыми образами – это оригинальный и ценный научный вклад автора не только в морфологию на базе скелетных описаний, но и на уровне проективной морфологии в целом.

Наконец, предложенный способ сочетания метрических и топологических свойств морфологической проекции (а значит, и предложенной морфологической полуметрики), реализуемый через взятие максимального изоморфного подграфа в скелете (построение максимального изоморфного подциркуляра), также несомненно является новым. Он обеспечивает уникальный компромисс между необходимостью сравнения образов, устойчивого к гибким и нетривиальным трансформациям фигур, и необходимостью распознавания объектов, различающихся не только топологическими, но и, прежде всего, геометрическими свойствами. Насколько мне известно, ни одна мера сходства подобного типа не была ранее описана в научной литературе.

В качестве достоинств данной работы необходимо отметить отличный стиль изложения, строгость определений и четкость доказательств. Следует также обратить внимание на активное участие автора в российской и международной научной жизни, и достаточно высокую международную оценку полученных результатов (в частности, *победитель в номинации лучшая работа* на конференции ICCSA, Фукуока, Япония, 2010).

В качестве недочетов по содержанию и оформлению данной работы можно указать следующие:

1) В работе рассматриваются две основные задачи – сегментации фигур и сравнения фигур. При этом задача сравнения фигур исследована достаточно полно – как теоретически, так и экспериментально, в том числе – путем сопоставления результатов с альтернативными подходами на известных публичных базах изображений. Задача же сегментации решена в большей степени на теоретическом уровне. Желательно было бы привести большее количество примеров сегментации фигур, а также провести экспериментальное сравнение с другими известными методами сегментации.

2) В определении одnoreберного скелетного оператора указано, что данный оператор по фигуре строит максимальную евклидову цепь ее скелета. При этом далее (в доказательстве Теоремы 2 в диссертации) утверждается, что одnoreберный скелетный оператор строит скелетные графы, состоящие ровно из одного ребра. Для того, чтобы это утверждение было полностью корректным, автору необходимо было в явном виде указать, что после удаления всех ветвей, примыкающих к цепочке, такая цепочка может рассматриваться как одно ребро (что топологически безусловно верно).

3) В автореферате множество допустимых проекций  $V(A, \Phi)$  используется в определении 17, в то время как оно определено лишь в определении 19 ниже (в тексте диссертации такой инверсии порядка определений нет).

4) Термины «циркулярная мера сходства» и «циркулярное расстояние» используются в работе как синонимы, что не совсем верно, поскольку в строгом смысле расстояние это все-таки мера различия, которая, конечно, может использоваться и для оценки сходства, но как функционально обратная величина.

5) Экспериментальные результаты сравнения фигур в задаче распознавания имеют большой практический интерес и, судя по всему, действительно свидетельствуют о существенном прогрессе, достигнутом автором в данной области. В связи с этим представлялось бы целесообразным, помимо описанных показателей, привести в работе полный спектр характеристик надежности распознавания, которые принято приводить для подобных методов распознавания: кривые ошибок FAR-FRR, равные ошибки ERR, вероятности поиска в базах Recall-Precision, вероятности попадания в список из  $n$

кандидатов (СМС) и т.п. Такие стандартные характеристики вычисляются по тем же экспериментальным данным, которые приводит автор, и позволяют обеспечить явное сравнение с аналогичными характеристиками альтернативных методов, известными по публикациям.

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы. Работа производит целостное впечатление, написана на хорошем математическом уровне, содержит четкую постановку задачи, доказательство ряда теоретических утверждений и описание достаточного количества численных экспериментов. Перечисленные выше оригинальные результаты работы не имеют аналогов в известных оппоненту публикациях, т.е. являются новыми научными результатами. Содержание диссертации в достаточной степени опубликовано в научной печати, в том числе – в 2 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК. Результаты работы прошли широкую апробацию на ведущих российских и международных конференциях и семинарах. Научная достоверность и обоснованность полученных результатов определяются корректностью применения используемых в работе математических методов, а также полученным в ходе численных экспериментов подтверждением практической работоспособности предложенных методов.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Тематика и содержание диссертационного исследования соответствуют специальности 01.01.09 - Дискретная математика и математическая кибернетика.

В целом данная диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне на актуальную тему, содержит новые научные результаты, имеющие существенное значение для рассматриваемой предметной области, и отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Домахина Людмила Григорьевна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.09 «Дискретная математика и математическая кибернетика».

**Официальный оппонент,**

**начальник подразделения “Системы интеллектуального анализа данных,  
технического зрения, улучшенного и синтезированного видения”**

**ФГУП «ГосНИИАС», д.ф.-м.н.**

**Визильтер Ю. В.**

**Подпись Визильтера Ю. В. заверяю**

**Ученый секретарь ФГУП «ГосНИИАС», д.т.н.**

**Мужичек С. М.**

